



Tipo de artigo: Artigo original

Análise da tendência de falhas dos principais equipamentos de uma usina fotovoltaica a partir do histórico de operação

Thales Terrola e Lopes^a <https://orcid.org/0000-0002-5711-4178>

Pedro Almeida Sá Nogueira^a

^a Universidade Federal Fluminense - UFF, Departamento de Engenharia Elétrica, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil

Resumo: Como qualquer sistema de geração de eletricidade, as usinas fotovoltaicas estão sujeitas a falhas em seus equipamentos, podendo acarretar redução na sua capacidade de geração ou mesmo a interrupção total da usina. Por se tratar de usinas com elevado número de equipamentos, a exemplo centenas de milhares de módulos fotovoltaicos, centenas de inversores e quilômetros de condutores, o estudo da tendência de falhas nos seus equipamentos mostra ser de suma importância para a manutenção da performance da usina ao longo do seu tempo de vida. Desta forma, este trabalho realiza uma análise do histórico de falhas verificadas em uma grande usina fotovoltaica em operação, aplicando os indicadores clássicos da manutenção industrial, Tempo Médio entre Falhas e Taxas de Falhas, para avaliar e propor estratégias mais adequadas de manutenção preventiva e preditiva. A ferramenta Power BI é empregada no tratamento dos registros de falhas, cálculo dos indicadores e produção de relatórios analíticos para apoio a tomada de decisão. Os resultados obtidos indicam que a conjunção de dados históricos de falhas na operação com os indicadores de manutenção permite desenvolver estratégias para antecipar falhas potenciais, planejar intervenções preventivas e minimizar as interrupções não programadas.

Palavras-chave: manutenção, usina solar fotovoltaica, dados de falhas, taxa de falhas, tempo médio entre falhas.

Abstract: Electricity generation system like photovoltaic plants are subject to their equipment failures, which may result in a reduction in their generation capacity or even the complete interruption of the plant. These plants have many equipment, such as hundreds of thousands of photovoltaic modules, inverters, and kilometers of conductors. Like this, the study of the failure trend in their equipment proves to be very important for maintaining the plant's performance in your lifetime. This paper analyzes the history of failures observed in a large photovoltaic plant in operation, applying classic indicators of industrial maintenance, Mean Time Between Failures, and Failure Rates to evaluate and propose more appropriate preventive and predictive maintenance strategies. The Power BI tool processes failure records, calculates indicators, and produces analytical reports to support decision-making. The results obtained indicate that the combination of historical failure data with maintenance

indicators allows the development of strategies to anticipate potential failures, schedule preventive interventions, and minimize unscheduled interruptions.

Keywords: maintenance, photovoltaic power plant, failure data, failure mode, time between failures.

Como citar: LOPES, T.T., NOGUEIRA, P.A.S. **Análise da tendência de falhas dos principais equipamentos de uma usina fotovoltaica a partir do histórico de operação.** *Engevista*, vol. 22, n.1, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, 2024.

Autor para contato: Thales Terrola e Lopes. E-mail: thalesterrola@id.uff.br

Financiamento: Nenhum.

Conflito de interesse: Nada a declarar.

1 INTRODUÇÃO

Usinas solares fotovoltaicas são sistemas que convertem a energia oriunda da radiação solar em energia elétrica, de natureza contínua, por meio de módulos fotovoltaicos. Para conexão a uma rede elétrica em corrente alternada, necessitam o uso de inversores, cujo papel principal é converter as grandezas em corrente contínua para a corrente alternada. Elevadas metragens de condutores para corrente contínua e alternada são empregadas para a conexão dos equipamentos, assim como caixas de junção para agrupamento de condutores e transformadores para a conexão ao sistema de transmissão de eletricidade. A Figura 1 ilustra uma configuração típica de uma usina solar fotovoltaica. Na subestação ou eletrocentro estão alocados os transformadores, equipamentos de medição, controle, proteção e seccionamento. Dependendo do porte da usina pode haver transformadores intermediários, que elevam a tensão após os inversores, criando uma rede elétrica interna de média tensão, que será conectada em uma subestação dotada de transformador de maior potência e responsável pela conexão ao sistema de transmissão. A conexão do gerador fotovoltaico (módulo) ao inversor é realizada por condutores em corrente contínua, enquanto a conexão do inversor a subestação e da subestação a rede elétrica é feita por condutores em corrente alternada. As caixas de junção ou *combiner boxes* estão dispersas na usina, podendo ser empregadas para agrupamento tanto de condutores em corrente contínua quanto alternada, entregando em sua saída um condutor de maior capacidade de condução.

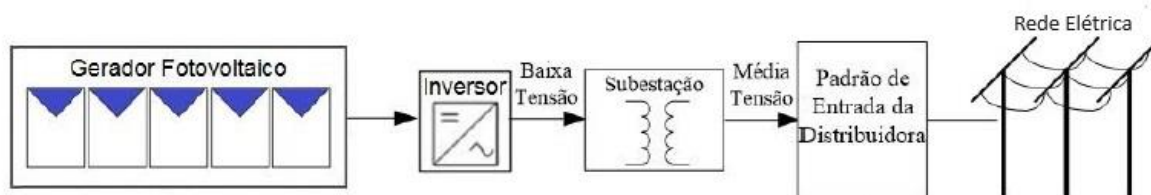


Figura 1. Configuração típica de uma usina solar fotovoltaica de energia elétrica.

Fonte: Adaptada de Pinho (2014).

Usinas fotovoltaicas podem apresentar potências da ordem de kWp a dezenas, centenas de MWp e a depender da sua potência, podem ser conectadas na média tensão (13,0 kV a 69 kV) ou diretamente no sistema de transmissão de energia elétrica, com tensões iguais ou superiores a 138 kV. Quanto maior a potência em Wp de uma usina solar fotovoltaica, maior o número de equipamentos empregados, principalmente em número de módulos e extensão de

condutores. Os inversores possuem alternativas na sua aplicação, que envolvem o uso de muitos inversores de baixa potência, chamados de inversores *strings*, ou alternativamente, poucos inversores de grande potência (inversores centrais) (Arias, 2022). O número de subestações e transformadores empregados na subestação para a conexão ao sistema de transmissão são, em geral, baixos, próximos a unidade. Porém, elevado número de transformadores de baixa potência pode ser empregados em usinas fotovoltaicas de grande porte, com centenas de MWp, para a criação de rede elétrica interna de média tensão e, assim, reduzir as perdas ôhmicas nos condutores de conexão entre inversores e subestação.

Como em qualquer sistema de geração de energia e pelo fato de envolver muitos equipamentos em sua configuração, usinas fotovoltaicas estão sempre sujeitas a falhas nos equipamentos, levando a perda de parte dos mesmos e, no pior caso, a interrupção de toda a geração da usina. Adiciona-se os custos elevados de manutenção e reparo destas falhas. Assim, o estudo da tendência de falhas em equipamentos e a definição de estratégias assertivas de manutenção, mostra ser de suma importância para que se maximize a geração de uma usina fotovoltaica.

A literatura técnica traz estudos sobre as tendências de falhas em equipamentos de usinas fotovoltaicas. O Relatório de Monitoramento do Parque Gerador da ANEEL de 2020 (ANEEL, 2020) analisou o desempenho de 31 usinas fotovoltaicas em operação comercial no Brasil e identificou o principal problema como sendo a perda de eficiência dos módulos fotovoltaicos. Essa falha pode ser causada por defeitos de fabricação, sujeira, sombreamento, desgaste ou danos físicos aos módulos. Já o estudo de Confiabilidade e Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos (IRENA, 2019), analisou as tendências de falhas em 48 usinas fotovoltaicas em todo o mundo. Os resultados indicaram que a perda de eficiência dos módulos fotovoltaicos foi o principal problema encontrado, seguido por falhas em inversores e falhas em cabos elétricos. Além disso, o estudo também apontou que a taxa de falhas em módulos fotovoltaicos tende a aumentar com o tempo de operação da usina, enquanto a taxa de falhas em inversores tende a ser mais constante ao longo do tempo. Somado a isso, incluem-se defeitos em inversores, devido ao envelhecimento dos componentes, erros de fabricação, superaquecimento ou sobrecarga, além de problemas com cabos elétricos, transformadores, dispositivos de proteção contra sobretensão e sistemas de monitoramento, como possíveis causas de falhas em usinas fotovoltaicas.

Neste contexto, o presente trabalho procura identificar quais são as falhas mais recorrentes durante a operação dos equipamentos de uma usina solar fotovoltaica real e, com base em dados históricos e aplicando indicadores, analisar a frequência de ocorrência destas falhas e se as estratégias de manutenção adotadas pela empresa nos últimos anos estão sendo eficazes e com resultados satisfatórios. Indicadores clássicos de manutenção industrial, como *Mean Time Between Failures* (MTBF) e *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) são explorados no trabalho, visando a sua aplicação para estimar e prevenir a recorrência de falhas nos equipamentos, contribuindo assim para o desenvolvimento de estratégias de manutenção preditiva e preventiva mais assertivas.

A ferramenta Power BI foi aplicada para a modelagem dos dados de falhas constantes no histórico de dados empregados no estudo e para o cálculo e análise dos indicadores, permitindo agrupar dados relevantes provenientes de distintas fontes, conduzir análises estatísticas, identificar padrões e tendências e a visualização dos dados e resultados por meio de painéis gráficos de controle e tabelas intuitivas.

2 INDICADORES DE TENDÊNCIA DE FALHAS

2.1 Medidas de prevenção contra recorrência de falhas

As primeiras práticas de manutenção foram registradas em documentos históricos relacionados à manutenção de equipamentos, na qual a ênfase estava apenas no conserto dos equipamentos que apresentavam falhas ou quebras. No entanto, ao longo do tempo, houve uma transformação significativa nesse conceito primitivo de manutenção. A perspectiva atual da manutenção é mais abrangente e orientada para o futuro, visando otimizar a performance e a eficiência dos equipamentos e das equipes responsáveis. Essa nova abordagem de manutenção vai além da simples resolução das falhas e quebras, mas busca identificar e mitigar as causas raiz desses problemas. O objetivo é prevenir ocorrências futuras e evitar interrupções indesejadas nos processos produtivos (Collin, 2015).

Nesta nova visão, metodologias avançadas como a análise de falhas, manutenção preditiva e monitoramento em tempo real são utilizadas para antecipar problemas potenciais e otimizar o desempenho geral dos sistemas de geração fotovoltaica, como abordado em (Oprea, 2019) e (Rediske, 2022).

A manutenção preditiva busca acompanhar o desempenho dos equipamentos ao longo do tempo de utilização, estabelecendo parâmetros para o seu funcionamento, através de monitoramento contínuo. Alguma ação no equipamento somente é realizada caso algum indicador esteja fora do padrão.

Mesmo com as técnicas inovadoras de manutenção, as clássicas técnicas preventiva e corretiva continuam sendo fortemente aplicadas em usinas de geração de energia elétrica, independentemente do tipo de fonte primária. A manutenção preventiva é realizada com base em um plano pré-estabelecido, de modo periódico, levando em consideração a vida útil dos componentes, recomendações dos fabricantes e histórico de falhas. Essa abordagem proativa busca substituir equipamentos e componentes desgastados ou obsoletos, antes que eles causem danos significativos ou interrupções no funcionamento, diminuindo a probabilidade de falhas futuras.

Manutenções corretivas são ações tomadas para corrigir falhas, defeitos ou problemas que surgem em um sistema, processo ou equipamento. No contexto das usinas fotovoltaicas, as medidas corretivas são essenciais para identificar e resolver qualquer tipo de falha ou mau funcionamento verificado nos seus equipamentos, de modo a reestabelecer a operação completa da usina. Resultados positivos nas técnicas de manutenção preditiva ou preventiva reduzem as ações de manutenção corretiva e o tempo de inoperância dos equipamentos da usina fotovoltaica.

2.2 Indicadores de Manutenção

Os indicadores de manutenção são ferramentas essenciais para acompanhar e avaliar o desempenho das atividades de manutenção em uma organização. Esses indicadores fornecem métricas quantitativas que ajudam a identificar áreas de melhoria, medir o progresso e tomar decisões informadas para otimizar os processos de manutenção.

Ao compreender os padrões de falha e identificar áreas críticas será possível implementar ações de manutenção que visem melhorar a eficiência operacional e reduzir os seus custos. Assim, para a identificação de uma possível falha antes da sua ocorrência, de modo que não seja impactada a geração da usina fotovoltaica, os indicadores de manutenção Tempo Médio entre Falhas (*Mean Time Between Failures* - MTBF) e Taxas de Falhas (TF) são aplicados

para a definição da estratégia de manutenção a ser adotada. As Equações (1) e (2) apresentam, respectivamente, o cálculo do MTBF e da Taxas de Falhas.

$$MTBF = \frac{T_D - T_M}{P} \quad (1)$$

$$T_F = \frac{T_M}{T_D} \quad (2)$$

onde:

- Tempo de Disponibilidade (TD): é o tempo ideal que o equipamento estaria operando caso não apresentasse nenhuma falha;
- Tempo de Manutenção (TM): é o tempo total que o equipamento fica parado devido a uma falha, inclusive o tempo de retomada;
- Número de paradas (P): quantidade de paradas que o equipamento apresentou em determinado período.

O tempo médio entre falhas (MTBF) mede o tempo médio que uma máquina ou equipamento opera antes de ocorrer uma falha, sendo uma medida fundamental e que auxilia na previsão do desempenho e na gestão de riscos de um sistema. Ao conhecer o MTBF de um componente ou sistema, é possível tomar decisões pertinentes sobre manutenção preventiva, planejamento de substituição, alocação de recursos e, até mesmo, na escolha dos melhores componentes para aumentar a confiabilidade geral do sistema.

A TF é a medida do número de falhas que ocorrem em um determinado período. É expressa como o número de falhas por unidade de tempo, como falhas por hora ou falhas por ano. Quanto maior a taxa de falhas, maior é o tempo de indisponibilidade dos equipamentos, o que pode resultar em grandes paradas na operação, custos adicionais de manutenção e perdas de receita.

3 ANÁLISE DAS FALHAS RECORRENTES NAS USINAS FOTOVOLTAICAS

3.1 Caracterização das falhas

Os equipamentos empregados em uma usina fotovoltaica estão sujeitos a uma ampla gama de falhas, sendo crucial o conhecimento sobre as principais ocorrências indesejáveis que podem surgir ao longo da sua vida útil (Johnson, 1972). Considerando que a quase totalidade das falhas verificadas para a usina fotovoltaica analisada residem em três equipamentos e um

componente dos inversores, somente estes foram considerados para análise das suas falhas e cálculo dos indicadores associados. A saber: módulos fotovoltaicos, inversores e transformadores para a formação da rede elétrica interna de média tensão e os módulos de fase dos inversores. Para os condutores e caixas de junção não foram verificadas falhas em número suficiente para a aplicação dos indicadores.

Os módulos fotovoltaicos estão sujeitos a falhas distintas que podem comprometer o seu desempenho e eficiência, podendo-se elencar: degradação progressiva dos seus materiais ao longo do tempo; desempenho comprometido pelo acúmulo de sujeira, poeira ou detritos em sua superfície; impactos físicos que resultam em rachaduras ou arranhões, podendo comprometer a sua integridade estrutural, o isolamento elétrico e, por conseguinte, o seu desempenho; e problemas nas conexões elétricas que podem surgir ao longo do tempo, com conexões soltas ou danificadas.

Embora grande parte das marcas de inversores sejam projetados com componentes eletrônicos de alta confiabilidade e durabilidade, estes componentes também estão sujeitos a uma série de falhas, representando o principal tipo de falha para este equipamento. Em geral, as falhas nos componentes estão relacionadas ao desgaste ao longo do tempo, mas eventos na rede elétrica como sobretensões repentinas causadas por descargas atmosféricas podem colocar uma pressão adicional nos seus componentes. Falhas por sobreaquecimento é outro ponto de atenção nos inversores, pois causa redução na sua eficiência, sendo ocasionadas principalmente por falhas no sistema de refrigeração. Adiciona-se, falhas nas conexões do inversor aos módulos e do inversor ao transformador, caracterizada por cabos soltos, conexões corroídas ou danificadas.

Por serem os formadores da rede de média tensão, os transformadores desempenham um papel crucial em grandes usinas fotovoltaicas e a sua perda resulta na interrupção do escoamento de significativos volumes de potência gerada. Os transformadores da média tensão possuem dispositivos externos para a sua proteção, mas estes são limitados quando comparado ao transformador elevador para o sistema de transmissão, que é dotado de dispositivos intrínsecos para monitoramento de grandezas, como temperatura e formação de gases, várias funções de proteção providas por relés externos e recursos para a emissão de alarmes (Mamede, 20011). Transformadores para a média tensão são tipicamente protegidos

somente pelas chaves fusíveis. As seguintes falhas foram verificadas nos transformadores: falhas no isolamento devido à sobrecarga, pela necessidade de operar com elevada geração frequentemente, o que resulta em altas temperaturas de operação, ocasionando gradual de deterioração do isolamento e conseqüente perda do seu dielétrico. A sobrecarga contínua também reduz significativamente a vida útil, exigindo elevadas manutenções corretivas ou reposições mais frequentes; assim como os inversores, problemas em suas conexões ao longo do tempo também são falhas recorrentes, podendo ocasionar aumento das perdas, aumento da resistência elétrica, aquecimento excessivo e, em casos extremos, danos ao transformador; falhas em varistores e outros tipos de proteção contra sobretensões, como os para-raios, na ocorrência de descargas atmosféricas, comprometendo a isolação.

Importante ressaltar que normas são aplicadas no projeto dos transformadores para minimizar as falhas contra sobretensão, destacando a IEC 60076 (IEC, 2006), que estabelece requisitos abrangentes para o projeto, fabricação e teste de transformadores de potência, visando garantir a sua confiabilidade e desempenho e a NBR 14039 (ABNT, 2005), que define as condições de segurança elétrica em instalações de média tensão, assegurando a correta operação e manutenção dos transformadores.

O módulo de fase é uma parte do circuito de controle do inversor, monitorando a frequência da rede elétrica e sincronizando a saída do inversor com a frequência da rede. Falhas neste módulo tem impacto direto na operação do inversor, resultando em perdas significativas na geração de eletricidade. Quando um ou mais módulos de fase estão com mau funcionamento ou desbalanceados, há uma redução na eficiência, elevando as perdas na conversão CC – CA.

3.2 Caracterização dos dados históricos de falhas

Registros do histórico de operação nos anos de 2021, 2022 e até abril de 2023, de uma usina fotovoltaica real são utilizados para produzir um banco de dados com as falhas associadas aos equipamentos destacados no tópico anterior. Os registros normalmente incluem informações da data em que a falha foi registrada, o tipo de falha ocorrida e o local específico em que ela ocorreu, sendo obtidos do sistema supervisório SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). Esses registros brutos foram submetidos a um processo de tratamento e organização, sendo compilados no banco de dados empregado no estudo.

Por questões de sigilo, o nome e o local da usina não podem ser divulgados. A usina fotovoltaica em questão é composta por 11 subdivisões, cada uma delas representando uma Sociedade de Propósito Específico (SPE). Sua potência instalada é superior a 350 MW, com infraestrutura robusta, que consiste em 170 transformadores aéreos de média tensão plenamente operacionais, utilizados para a formação da rede interna de distribuição, a qual se conecta ao transformador elevador para o sistema de transmissão. A usina conta com uma grande quantidade de inversores *string*, totalizando a marca de 329 unidades em operação. Para alimentar toda essa capacidade, a usina possui mais de 1.200.000 (um milhão e duzentos mil) módulos fotovoltaicos.

Cada uma das 11 áreas apresentadas é subdividida em 7 ou 8 subáreas chamadas de Estações de Média Tensão (*MV Station*), com variação no número de subáreas de acordo com o tamanho das áreas. As áreas 1, 8 e 11 possuem 7 subáreas, enquanto as demais possuem 8 subáreas. Nesta usina, cada *MV Station* é equipada com dois transformadores de média tensão, sendo que em cada transformador estão conectados dois inversores, totalizando assim quatro inversores por *MV Station*. A Figura 2 detalha a distribuição dos equipamentos na usina fotovoltaica, considerando a subdivisão em 11 áreas.

SPE	MV STATION	TRANSFORMADORES	INVERSORES	MÓDULOS FOTOVOLTAICOS
Área 01	7	14	27	97200
Área 02	8	16	31	125550
Área 03	8	16	31	125550
Área 04	8	16	31	125550
Área 05	8	16	31	125550
Área 06	8	16	31	125550
Área 07	8	16	31	125550
Área 08	7	14	27	97200
Área 09	8	16	31	125550
Área 10	8	16	31	125550
Área 11	7	14	27	97200
TOTAL	85	170	329	1.296.000

Figura 2. Número de equipamentos em cada área da usina fotovoltaica.

Fonte: o autor.

As Figuras 3, 4 e 5 apresentam o número de falhas verificadas no intervalo de tempo e nos seguintes equipamentos: módulos fotovoltaicos, módulo de fase dos inversores e

transformadores. Estas figuras foram obtidas a partir da ferramenta *Power BI* e representam um mapa de árvore, onde cada retângulo nas subáreas são um ponto de transformação de média tensão (*MV Station*) e o tamanho do retângulo é proporcional ao número de falhas.



Figura 3. Número de falhas por Área e *MV Station* para módulos fotovoltaicos.

Fonte: o autor.



Figura 4. Número de falhas por Área e *MV Station* para os módulos de fase dos inversores.

Fonte: o autor.



Figura 5. Número de falhas por Área e MV Station para transformadores.

Fonte: o autor.

Para os inversores foi feita uma análise mais aprofundada, procurando identificar os componentes do equipamento com maiores falhas. Além das estratégias de manutenção, esta identificação é importante para a aquisição de componentes de reposição para os inversores e avaliação de fornecedores destes equipamentos. A Figura 6 destaca os componentes dos inversores que apresentaram o maior número de falhas para o ano de 2022, revelando que a falha por comunicação foi a mais frequente (17,39%), seguida pela falha no disjuntor AC (16,42%) e falha na chave IGBT (14%). A Figura 7, por sua vez, traz uma análise comparativa entre o número de falhas verificadas em inversores fotovoltaicos nos anos de 2021 e 2022, apresentando o ano de 2022 um maior número de falhas, principalmente no segundo semestre deste ano. Tal situação mostra que a estratégia de manutenção adotada não foi adequada, carecendo de ajustes.

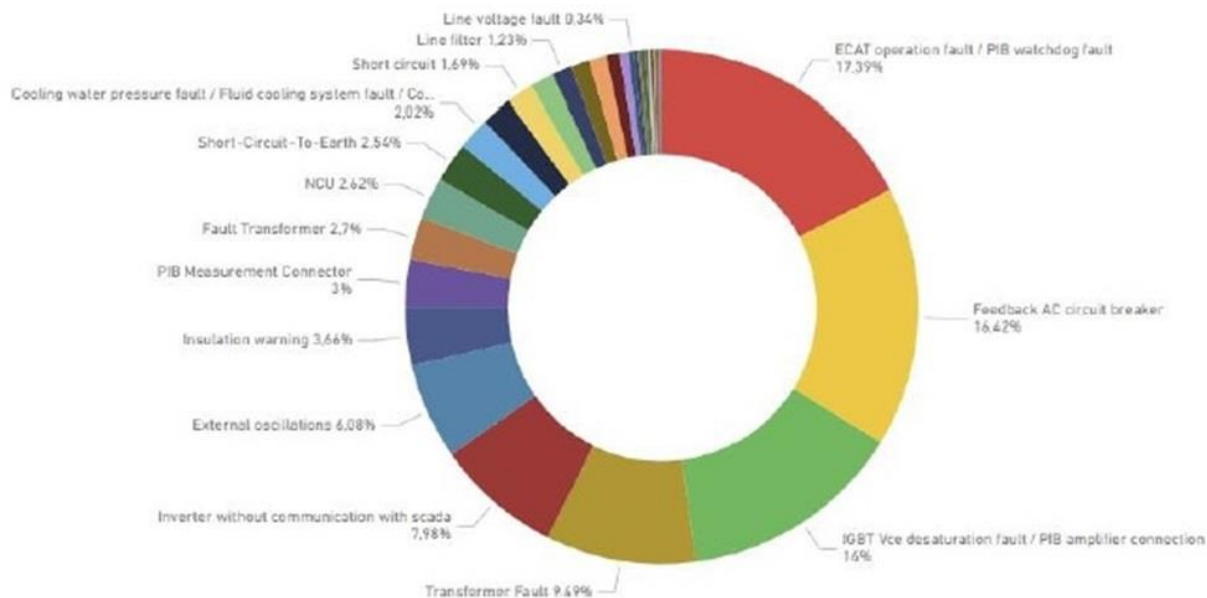


Figura 6. Principais componentes com falhas em inversores no ano de 2022.

Fonte: o autor.

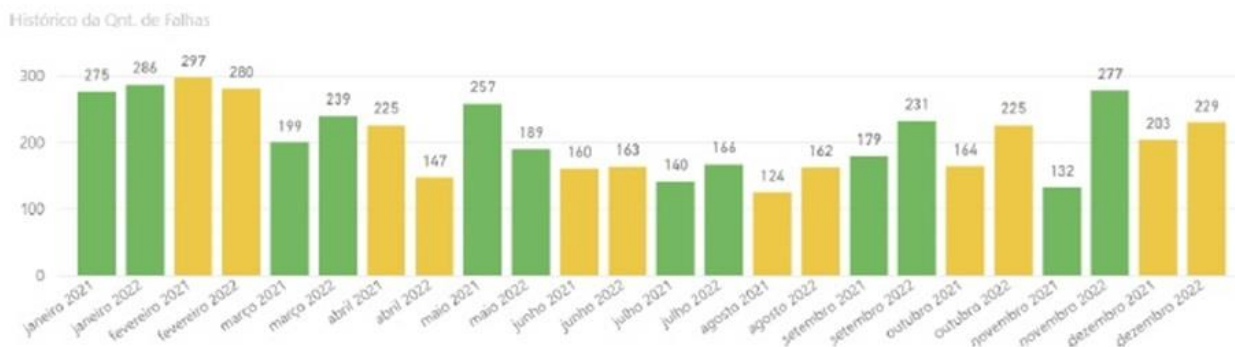


Figura 7. Número total de falhas em inversores nos anos de 2021 e 2022.

Fonte: o autor.

4 PREVISÃO DE FALHAS NA USINA FOTOVOLTAICA

O cálculo do MTBF com base nos dados históricos permite determinar a probabilidade de uma falha ocorrer dentro de um determinado período. Essa informação é extremamente valiosa, pois permite planejar intervenções de manutenção preventiva com relativa antecedência, reduzindo o risco de paralisação inesperada e minimizando custos de reparo e perdas na geração de energia.

A Figura 8 realiza um comparativo entre o MTBF calculado para os anos de 2021 e 2022, considerando todos os quatro equipamentos analisados. O aumento do MTBF de um ano para

o outro indica um progresso positivo em termos de redução de falhas na usina fotovoltaica, o que se caracteriza nas áreas 03, 04, 05, 06, 07 e 11. Por outro lado, em algumas áreas o MTBF apresentou redução, como nas áreas 01, 02, 08, 09 e 10, indicando que há problemas recorrentes que precisam ser resolvidos.

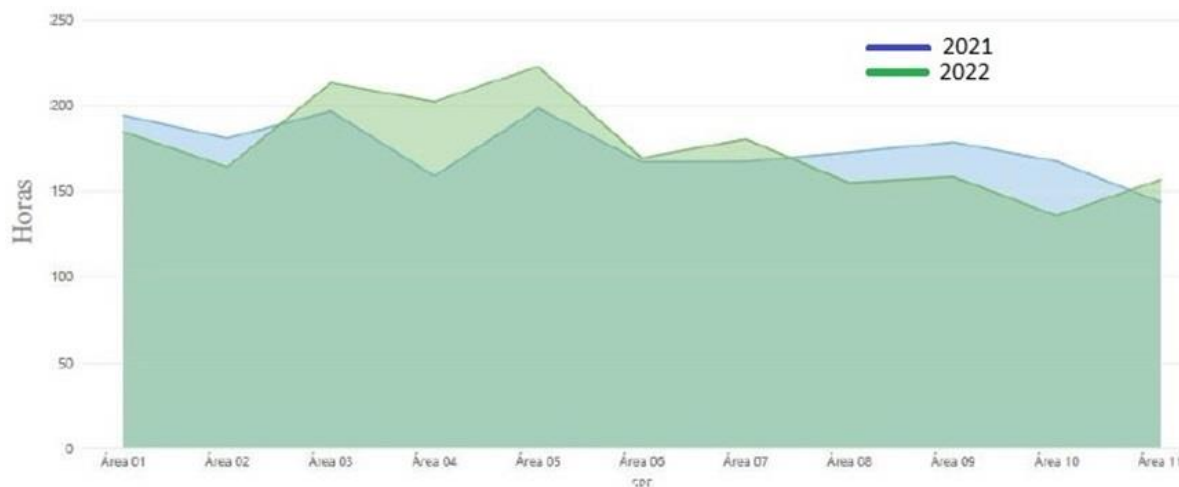


Figura 8. Comparativo do MTBF nos anos de 2021 e 2022.

Fonte: o autor.

A Taxa de Falhas (TF), por sua vez, fornece uma visão clara da confiabilidade dos equipamentos, permitindo identificar aqueles com maiores taxas de falhas e implementar estratégias para reduzir as suas interrupções não planejadas. A Figura 9 faz um comparativo entre as taxas de falhas verificadas nos anos de 2021 e 2022. Observa-se que as ações de manutenção preditivas implementadas na usina fotovoltaica entre 2021 e 2022 foram efetivas, especialmente no mês de janeiro de 2022, quando a taxa de falhas e indisponibilidade dos equipamentos apresentou uma redução drástica. Esses resultados indicam os benefícios das medidas de manutenção preditiva adotadas, contudo ainda há espaços para melhorias, haja visto que entre os meses de agosto e novembro a taxa de falhas não se reduziu de 2021 para 2022.

Importante destacar que as informações trazidas pelo MTBF e a TF possibilitam extrair várias conclusões sobre a operação da usina fotovoltaica. A Taxa de Falha é um indicador fundamental para avaliar a disponibilidade e o desempenho dos equipamentos utilizados na usina. A sua informação pode ser complementada pela análise do MTBF de anos diferentes, que pode ajudar a avaliar a qualidade dos equipamentos e dos seus componentes. Se o MTBF reduzir consideravelmente ao longo dos anos, isso pode indicar que os componentes estão se

desgastando mais rapidamente do que o esperado ou que foram utilizados materiais de baixa qualidade. Essa informação pode ser usada para aprimorar o processo de seleção de fornecedores e melhorar a durabilidade dos equipamentos utilizados na usina. O MTBF possibilita também, identificar padrões sazonais em relação às falhas do sistema. Por exemplo, pode-se descobrir que certos meses ou períodos do ano têm um MTBF menor devido as condições ambientais específicas, como ocorrência de tempestades ou altas temperaturas.

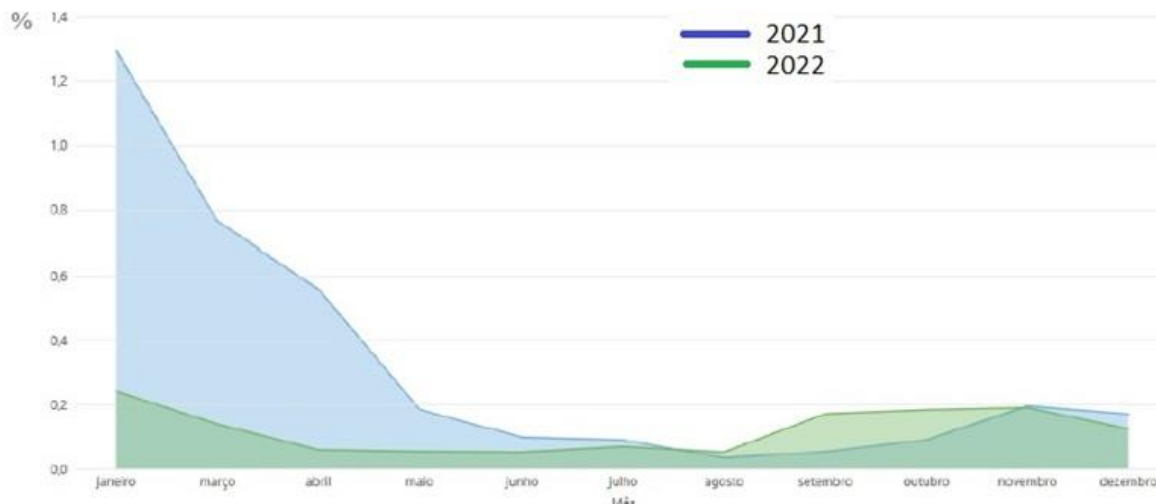


Figura 9. Comparativo do TF nos anos de 2021 e 2022.

Fonte: o autor.

5 CONCLUSÕES

A prevenção de falhas em usinas fotovoltaicas é uma ação estratégica, desempenhando um papel significativo na redução de custos, por minimizar os gastos com retrabalho, reparos emergenciais, perda de produtividade e danos aos equipamentos. Ao adotar uma abordagem proativa e implementar medidas de prevenção de forma contínua, as equipes de Operação e Manutenção podem melhorar sua capacidade de identificar e solucionar problemas antes que eles se tornem mais graves, o que resulta em um desempenho aprimorado da usina, com maior geração de energia elétrica e conseqüente remuneração financeira do capital investido. Assim, este trabalho realizou uma análise da tendência de ocorrência de falhas nos principais equipamentos de uma usina solar fotovoltaica, a partir de dados históricos da operação da

usina e aplicando indicadores clássicos de manutenção, o MTBF e a Taxa de Falhas. Os resultados apresentados indicam que a conjunção de dados históricos de operação com os indicadores de manutenção permite desenvolver estratégias de manutenção para antecipar falhas potenciais, planejar intervenções preventivas e minimizar as interrupções não programadas, sendo uma importante técnica para a melhoria do desempenho da usina fotovoltaica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL); Relatório de Monitoramento do Parque Gerador - Energia Solar Fotovoltaica. 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/10181/4235811/Relat%C3%B3rio+de+Monitorament+o+do+Parque+Gerador+de+Energia+Solar+Fotovoltaica+2020>.

ARIAS, V. C.; *Comparação entre a aplicação de inversores centrais e strings em uma usina solar fotovoltaica: análise técnica e financeira*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal Fluminense, 2023. Disponível em:

<http://app.uff.br/riuff/handle/1/27456>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). “NBR 14039: Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV”. Rio de Janeiro, 2005.

COLLI, A.; *Failure mode and effect analysis for photovoltaic systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 50, p. 804–809, 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.056>

IEC. IEC 60076-1: Power transformers — Part 1: General. Edition 2.1, Genebra, 1999. p. 91.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). *Global energy transformation: a roadmap to 2050 (2019 edition)*. 2019.b. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to2050-2019> Edition.

JOHNSON, W. B.; *Computer simulations in fault diagnosis training: an empirical study of learning transfer from simulation to live system performance*. Thesis, University of Illinois, USA, 1972. Disponível em:

<https://www.proquest.com/openview/2e3e307626dda9f3701a0386bf2b58f2/1?pqorigsite=scholar&cbl=18750&diss=y>

MAMEDE FILHO, J.; “Proteção de Sistemas Elétricos de Potência”. Editora LTC, 2011.

OPREA, S; BÂRA, A; PREOȚESCU, D; ELEFTERESCU, L.; *Photovoltaic Power Plants (PV-PP) Reliability Indicators for Improving Operation and Maintenance Activities. A Case Study of PV-PP Agigea Located in Romania*. IEEE Access, 2019. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2907098.

PINHO, J.; GALDINO, M.; “Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos”. Cepel-Cresesb, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em:
<https://energiasolarfotovoltaica.ufsc.br/referencia-bibliografica-2/referencia-bibliografica/>

REDISKE, G.; MICHELS, L., SILUK, J. C. M.; RIGO, P. D.; *Management of operation and maintenance practices in photovoltaic plants: Key performance indicators*. International Journal of Energy Research, 46 (6), 2022. <https://doi.org/10.1002/er.7737>

Contribuição dos autores: Este artigo científico é resultado do Trabalho de Conclusão do Curso (TCC) de graduação em Engenharia Elétrica na UFF do Pedro Almeida Sá Nogueira, sob a orientação do professor Thales Terrola e Lopes. A redação do artigo foi realizada pelo professor Thales, a partir dos resultados apresentados no referido Trabalho de Conclusão de Curso. No desenvolvimento do estudo coube ao Pedro o levantamento e análise dos dados de falhas, modelagem na ferramenta Power BI, desenvolvimento dos indicadores de manutenção aplicados e redação inicial do trabalho. Ao professor Thales coube a validação dos dados levantados, análise e discussão dos resultados alcançados e revisões sistemáticas do texto do trabalho até se alcançar a versão final do documento, com posterior redação do presente artigo.

Editores: Bruno Campos Pedroza, Mayra Soares Pereira Lima Perlingeiro.